

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.17.014

# 高温制浆废水嗜热菌-混凝系统处理效能影响因素

舒彬<sup>1</sup>, 李志刚<sup>2</sup>, 王海<sup>3</sup>, 石烁辉<sup>3</sup>, 匡发国<sup>3</sup>, 周炯<sup>3</sup>,  
周健<sup>3</sup>

(1. 重庆设计集团有限公司市政设计研究院, 重庆 400020; 2. 中国市政工程西南设计研究院总院有限公司, 四川 成都 610299; 3. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 以高温制浆废水为处理对象,构建制浆废水嗜热菌生物膜处理系统,考察了有机负荷、DO浓度、pH对制浆废水嗜热菌生物膜系统处理效能的影响,以及嗜热菌-混凝组合系统的处理效能。结果表明,制浆废水高温(50℃)嗜热菌生物膜系统与常温(30℃)系统的处理效能无显著差异,但微生物菌群结构存在显著差异。有机负荷、DO浓度、pH对高温制浆废水嗜热菌系统去除COD的影响显著,而对去除色度的影响不显著。在温度为50℃、有机负荷为0.4 kg/(m<sup>3</sup>·d)、DO为3.0 mg/L的条件下,嗜热菌生物膜系统对COD、色度的去除率分别可达到68.49%、23.27%;嗜热菌-混凝组合系统对COD和色度的总去除率分别为84.98%和85.36%,其中嗜热菌生物处理单元对COD和色度的去除分担率分别为68.58%和23.36%,混凝单元对COD和色度的去除分担率分别为16.40%和62.00%。制浆废水中引起色度的类黑精和类木质纤维素等物质主要通过混凝单元去除。

**关键词:** 制浆废水; 高温; 嗜热菌; 混凝; 影响因素

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)17-0092-06

## Factors Influencing the Performance of Thermophilic Bacteria and Coagulation Combined System in Treating High-temperature Pulping Wastewater

SHU Bin<sup>1</sup>, LI Zhi-Gang<sup>2</sup>, WANG Hai<sup>3</sup>, SHI Shuo-hui<sup>3</sup>, KUANG Fa-guo<sup>3</sup>,  
ZHOU Jiong<sup>3</sup>, ZHOU Jian<sup>3</sup>

(1. Chongqing Design Group Co. Ltd. Municipal Design Institute, Chongqing 400020, China;  
2. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610299,  
China; 3. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of  
Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** A thermophilic bacteria biofilm treatment system was established for treating high-temperature pulping wastewater. The influences of organic load, DO and pH on the treatment efficiency of the thermophilic bacteria biofilm system and pollutants removal in the combined system of thermophilic bacteria and coagulation were explored. There was no significant disparity in the treatment efficacy between the high-temperature (50℃) thermophilic bacteria biofilm treatment system and the normal-temperature (30℃) system. However, a significant difference existed in the composition of the microbial

基金项目: 重点产业共性关键技术创新专项(cstc2017zdcy-zdyfx0081)

通信作者: 周健 E-mail: zhoujiantt@126.com

community. The influences of organic load, DO and pH on the removal of COD in high-temperature pulping wastewater by the thermophilic bacteria system were remarkable, yet the impacts on the removal of chromaticity were insignificant. Under the conditions of temperature of 50 °C, organic load of 0.4 kg/(m<sup>3</sup>·d), and DO of 3.0 mg/L, the removal rates of COD and chromaticity in the thermophilic bacteria biofilm system were 68.49% and 23.27%, respectively. The total removal rates of COD and chromaticity by the thermophilic bacteria and coagulation combined system were 84.98% and 85.36%, respectively. The removal rates of COD and chromaticity were 68.58% and 23.36% by the thermophilic bacteria, and 16.40% and 62.00% by the coagulation unit, respectively. Substances like melanoidin and lignocellulose that caused chromaticity in pulping wastewater were predominantly removed by the coagulation unit.

**Key words:** pulping wastewater; high temperature; thermophilic bacteria; coagulation; influence factor

造纸行业是我国污染排放的重点行业。其中,制浆废水水质成分复杂,含有木质素、纤维素、半纤维素等难降解有机物,特别是由于废水温度高达 50~60 °C,需要在生物处理系统前设置冷却系统,降温后才能进行生物处理,增加了制浆废水的处理能耗、处理成本及运行管理的复杂性,成为亟待解决的难点问题。目前,制浆废水主要采用物化(混凝、高级氧化、电渗析)和生物(好氧、厌氧)技术进行处理<sup>[1]</sup>。常温生物处理系统中微生物菌属不适应高温环境,但嗜热菌的发现为高温制浆废水的生物处理提供了可能<sup>[2~4]</sup>。另外,制浆废水生物处理系统出水中仍含有大量木质素类难降解有机物,通常需要采用高级氧化技术进一步处理<sup>[5~6]</sup>。笔者针对现行高温制浆废水处理工程中冷却系统能耗高、运行成本高、管理复杂等问题,提出了高温(50 °C)制浆废水嗜热菌-混凝组合处理技术,重点探究制浆废水嗜热菌系统的构建方法;并利用 16S rRNA 高通量测序方法分析系统中的微生物菌群结构及优势功能菌属,重点考察有机负荷、DO 浓度、pH 对嗜热菌系统处理效能的影响。在此基础上,探究制浆废水嗜热菌-混凝组合系统的处理效能,并利用三维荧光光谱分析组合系统中的有机物及其去除途径,以期在高温制浆废水的处理开辟新路径。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置

试验采用好氧序批式生物膜反应器(SBBR),如图 1 所示。反应器高为 18 cm,内径为 10 cm,有效容积为 1 L,内置组合填料,填充率为 40%,作为嗜热菌生物膜附着生长的载体;采用曝气砂头充氧,通过

高温溶解氧仪在线监测 DO 浓度;反应器外包温度控制仪的恒温加热带。

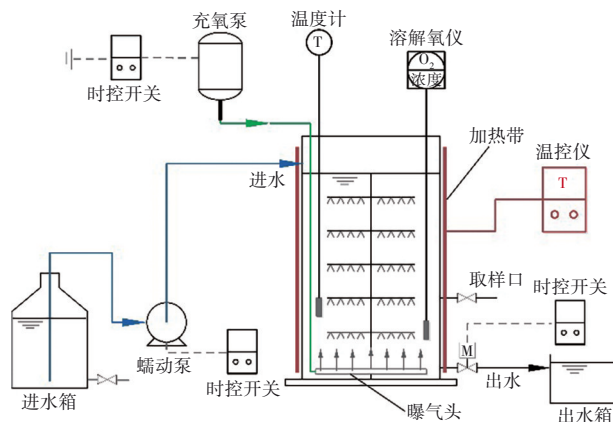


图 1 试验装置

Fig.1 Schematic diagram of SBBR

### 1.2 试验进水水质

试验用制浆废水取自某造纸厂制浆废水处理工程生物池进水,其 COD 为 506~869 mg/L, TOC 为 237~267 mg/L, BOD<sub>5</sub> 为 148~222 mg/L, BOB<sub>5</sub>/COD 为 0.26~0.29, 色度为 317~361 倍, pH 为 7.35~7.45。水质指标均采用国家标准方法测定。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 制浆废水嗜热菌生物膜处理系统构建

构建制浆废水嗜热菌生物膜处理系统,接种制浆废水处理工程生物池污泥 10 g/L,反应器 S1 的温度控制为 50 °C、有机负荷(以 COD 计,下同)为 0.4 kg/(m<sup>3</sup>·d)、DO 为 3.0 mg/L、pH 为 7.0、周期运行时间为 12 h,运行工况为瞬时进水→曝气(11.5 h)→沉淀(0.5 h)→瞬间排水。同时,运行温度为 30 °C 的对照组反应器 S2。

### 1.3.2 制浆废水嗜热菌处理系统影响因素研究

通过平行试验,考察有机负荷、DO、pH对制浆废水嗜热菌系统处理效能的影响。阶段1:在温度为50℃、DO为3.0 mg/L、pH为7.0条件下,控制反应器有机负荷分别为0.2、0.4和0.6 kg/(m<sup>3</sup>·d);阶段2:在温度为50℃、有机负荷为0.4 kg/(m<sup>3</sup>·d)、pH为7.0条件下,控制反应器DO分别为2.0、3.0、4.0 mg/L;阶段3:在温度为50℃、有机负荷为0.4 kg/(m<sup>3</sup>·d)、DO为3.0 mg/L条件下,控制反应器pH分别为6.0、7.0、8.0。

### 1.3.3 制浆废水嗜热菌-混凝组合系统效能研究

在温度为50℃、有机负荷为0.4 kg/(m<sup>3</sup>·d)、DO为3.0 mg/L、pH为7.0的条件下运行生物反应器,根据预混凝试验结果,混凝单元投加混凝剂聚合硫酸铁(PFS)和助凝剂聚丙烯酰胺(PAM),投加量分别为225和1 mg/L,考察制浆废水嗜热菌-混凝组合系统的处理效能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 制浆废水嗜热菌生物膜处理系统构建

制浆废水嗜热菌(50℃)生物膜系统(S1反应器)及常温(30℃)生物膜系统(S2反应器)的运行效果如图2所示。

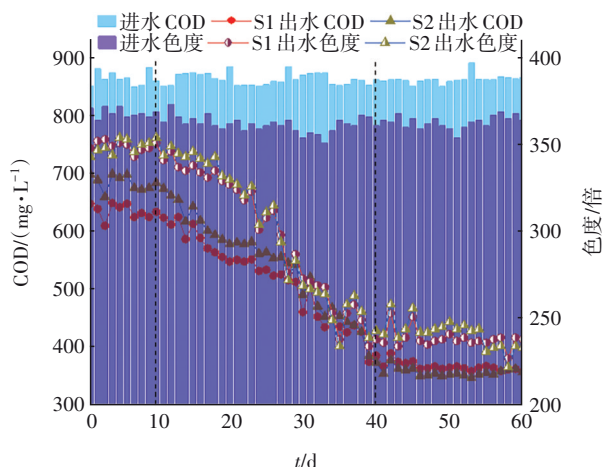


图2 S1和S2系统进、出水水质的逐日变化

Fig.2 Daily variation of influent and effluent quality in S1 and S2 systems

由图2可知,随着启动时间的增加,反应器S1、S2对COD和色度的去除率逐渐升高。运行可分为3个阶段:1~10、11~40、41~60 d。反应器S1在3个阶段对COD和色度的平均去除率分别为26.32%、36.78%、58.03%和3.96%、16.83%、32.39%;反应

器S2在3个阶段对COD和色度的平均去除率分别为24.87%、35.13%、58.76%和3.94%、16.77%、32.15%。在第3阶段运行稳定后,测得高温系统S1和常温系统S2中生物膜的生物量分别为14.20和14.47 g/L。可以看出,制浆废水嗜热菌生物膜系统的处理效能与常温系统相比无显著差异,制浆废水嗜热菌处理系统可以代替常温生物处理系统,并省去现有处理工程中的冷却系统。

分别采集S1和S2系统构建前、后的微生物样品,进行16S rRNA高通量测序,两个系统中门水平和属水平上的微生物群落结构如图3所示。

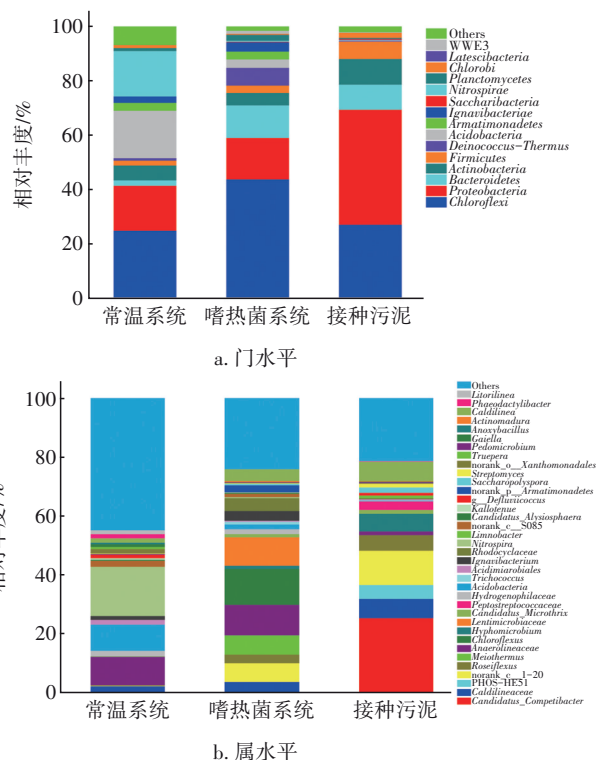


图3 系统构建前、后门水平和属水平上的微生物群落结构  
Fig.3 Microbial community structure at the phylum and genus levels before and after system construction

由图3(a)可知,反应器运行60 d后,高温系统S1中优势菌门主要有Chloroflexi、Proteobacteria、Bacteroidetes。与接种污泥相比,S1系统中Chloroflexi菌门的相对丰度由27.31%增至43.88%,其门下的Chloroflexus菌属增加了12.13%,而在S2系统中则降至25.08%;S1、S2系统中Proteobacteria菌门的相对丰度由42.22%分别降至15.29%、16.55%;S1系统中Bacteroidetes菌门的相对丰度由9.25%升高到12.01%,在S2系统中则降至2.15%。



在高温系统S1中,有机物降解功能菌属主要有 *Blastocatella* (3.45%)、*Deftuicoccus* (1.40%)、*Truepera* (0.85%)、*Gaiella* (0.78%)、*Anoxybacillus* (0.62%) 和 *Kallotenue* (0.36%), 其中, *Blastocatella* 菌属是好氧化能有机营养菌,其属下的 *Blastocatella fastidiosa* 具有降解纤维素的能力; *Deftuicoccus* 和 *Gaiella* 菌属具有降解多环芳烃和多元酚的能力; *Truepera*、*Anoxybacillus* 和 *Kallotenue* 菌属具有嗜热特性,它们在纤维素和半纤维素的分解中发挥了重要作用。在常温系统S2中, *Blastocatella*、*Deftuicoccus*、*Truepera*、*Gaiella* 和 *Kallotenue* 菌属的相对丰度分别为 0.01%、0.1%、0.17%、0.08% 和 0.12%, 远低于它们在高温系统S1中的相对丰度,并且, S2系统中未检出 *Anoxybacillus* 菌属。上述结果表明,制浆废水高温嗜热菌生物膜系统与常温系统中的有机物降解功能菌属种群结构存在显著差异。在高温嗜热菌系统中,无法适应高温的微生物被逐步淘汰,嗜热菌成为优势菌。另外,以附着在组合填料载体表面的生物膜形式生长避免了嗜热菌沉降性差的问题。

## 2.2 制浆废水嗜热菌系统处理效能的影响因素

### 2.2.1 有机负荷的影响

有机负荷对制浆废水嗜热菌生物膜系统处理效能的影响如图4所示。可知,有机负荷对嗜热菌系统去除COD的影响显著,而对去除色度的影响不显著。随着有机负荷的增加,系统对COD、色度的去除率均先升高后降低。当进水COD和色度分别为(506±10) mg/L和(321±5) 倍、有机负荷为0.2 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,出水COD和色度分别为(208±6) mg/L和(271±7) 倍;当有机负荷由0.2 kg/(m<sup>3</sup>·d)增至0.4 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,系统对COD的去除率由58.33%增至68.49%,色度去除率由15.45%升至23.27%;当有机负荷继续增至0.6 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,COD去除率降低了6.71%,色度去除率降低了5.44%。分析认为,本研究通过改变水力停留时间来调控有机负荷,当提高有机负荷至0.4 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,嗜热菌系统对废水中有机物的降解较完全,出水COD浓度降低;当有机负荷进一步升至0.6 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,由于系统降解能力不足,出水中有机物浓度升高。制浆废水中的色度主要是由溶解在废水中的木质素及其衍生物等难降解有机物引起的,而木质素是一类结构复杂的网状高聚物,其生物可降解性较差,故不同有机

负荷条件下系统对色度的去除率均不高。

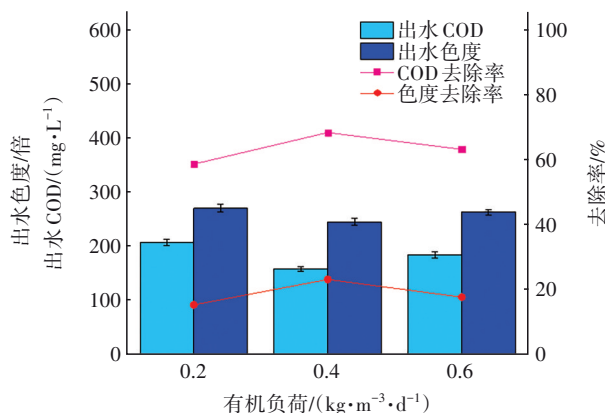


图4 有机负荷对系统去除COD、色度的影响

Fig.4 Effects of OLR on removal of COD and chromaticity

### 2.2.2 DO浓度的影响

与有机负荷的影响类似,DO浓度对嗜热菌系统去除COD的影响显著,而对去除色度的影响不显著。随着DO浓度的增加,系统对COD的去除率先升高后降低。当进水COD和色度分别为(506±10) mg/L和(321±5) 倍、DO浓度为2.0 mg/L时,出水COD和色度分别为(198±6) mg/L和(247±3) 倍,去除率分别为60.86%和22.93%;当DO浓度增至3.0 mg/L时,系统出水COD浓度降至(163±5) mg/L,去除率升至67.79%,而色度去除率略增至24.61%;当DO浓度继续增至4.0 mg/L时,COD和色度去除率分别降低了5.14%和1.93%。由2.1节可知,在嗜热菌系统中优势菌群为嗜热好氧菌属,其所需DO浓度高于常温生物处理系统。

### 2.2.3 pH的影响

pH亦是对嗜热菌系统去除COD的影响显著,对去除色度的影响不显著。随着pH的增加,系统对COD的去除率先升高后降低。当进水COD和色度分别为(506±10) mg/L和(321±5) 倍、pH为6.0时,出水COD和色度分别为(206±9) mg/L和(276±9) 倍,去除率分别为59.26%和13.84%;当pH增至7.0时,系统对COD和色度的去除率分别升至68.18%和24.30%;当pH继续增至8.0时,COD和色度去除率分别降低了4.42%和0.25%。因此,嗜热菌生物膜处理系统在中性偏碱性的条件下处理效能更高。

## 2.3 制浆废水嗜热菌-混凝组合系统的处理效能

制浆废水嗜热菌-混凝组合系统的处理效能如

图5所示。可知,经制浆废水嗜热菌-混凝组合工艺处理后,平均出水COD浓度为76 mg/L、色度为47倍,对COD和色度的总去除率分别为84.98%和85.36%,达到了《制浆造纸工业水污染物排放标准》(GB 3544—2008)。其中,嗜热菌生物处理单元对COD和色度的去除分担率分别为68.58%和23.36%,混凝单元对COD和色度的去除分担率分别为16.40%和62.00%,嗜热菌生物处理单元主要去除废水中的可生物降解有机物,混凝处理单元主要去除废水中的难降解有机物。

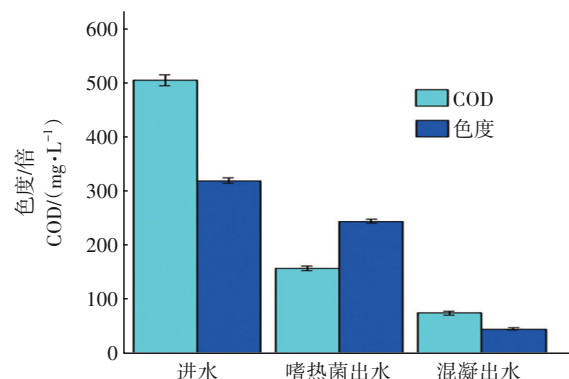


图5 嗜热菌-混凝组合系统对COD和色度的去除效能

Fig.5 Removal effect of COD and chromaticity by thermophilic bacteria-coagulation combined system

对进水、嗜热菌处理单元出水和混凝单元出水中的有机物进行三维荧光光谱分析,结果见图6,各区域的荧光强度见图7。其中,区域I~VII分别代表类酪氨酸、类色氨酸、溶解性微生物代谢产物、类富里酸、类糖化蛋白质、类黑精和类木质纤维素、类腐殖酸。由图6和图7可知,高温制浆废水经过嗜热菌-混凝组合工艺处理后,出水的三维荧光光谱各区域荧光强度较进水发生了显著变化。进水有机物总荧光强度为 $3.07 \times 10^8$  a. u. · nm<sup>2</sup>,荧光峰位于VI区(类黑精和类木质纤维素),且VI区荧光强度占比高达32.50%,表明类黑精和类木质纤维素是制浆废水中最主要的有机污染物,而这类有机物难以生物降解<sup>[7]</sup>。经过嗜热菌单元处理后,出水总荧光强度下降了 $9.52 \times 10^7$  a. u. · nm<sup>2</sup>,其中V区和VI区荧光强度占比分别降低了2.91%和0.69%,这表明嗜热菌生物处理单元去除了一小部分类糖化蛋白质、类黑精和类木质纤维素等难降解有机物,但各区域荧光强度占比变化不大,其中VI区的荧光强度占比依旧高达31.81%,因此,出水中仍然以类黑精和类木

质纤维素这类生物难降解有机物为主。嗜热菌单元出水经过混凝处理之后,总荧光强度进一步下降了 $2.08 \times 10^7$  a. u. · nm<sup>2</sup>,其中,V区和VI区荧光强度占比分别降低了4.33%和13.74%,可见混凝单元主要去除的是难降解大分子有机物,其中,木质素及其衍生物的去除使废水色度显著降低,色度去除率明显高于嗜热菌处理系统。

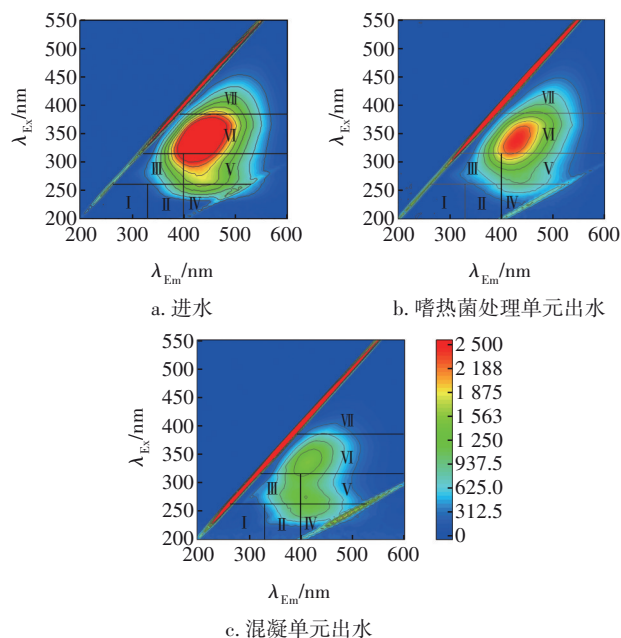


图6 处理系统进、出水的三维荧光光谱

Fig.6 Three-dimensional fluorescence spectroscopy of influent and effluent

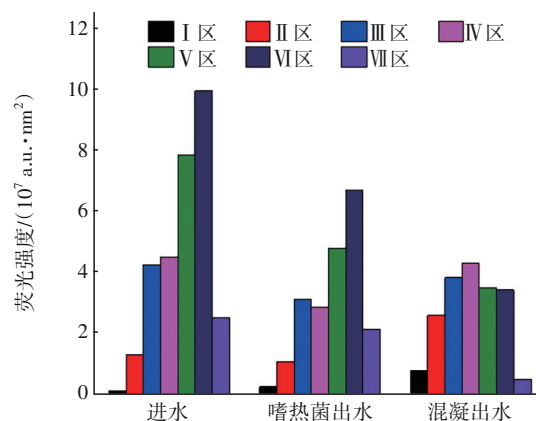


图7 各工艺单元进、出水荧光区域强度分布

Fig.7 Fluorescence intensity distribution of influent and effluent from every process unit

### 3 结论

① 高温嗜热菌生物膜处理系统和常温系统对高温制浆废水中COD、色度的去除效果无显著差

异,COD去除率分别为46.49%和48.74%,色度去除率分别30.81%和31.24%。16S rRNA高通量测序结果表明,高温嗜热菌生物膜处理系统与常温系统中的有机物降解功能菌群落结构及丰度存在显著差异。

② 有机负荷、DO浓度、pH对高温制浆废水嗜热菌生物膜系统去除COD具有显著影响,而对去除色度的影响不显著。制浆废水嗜热菌生物膜系统在有机负荷为 $0.4\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 、DO为 $3.0\text{ mg/L}$ 、pH为7.0的最佳工况条件下,对COD和色度的去除率分别可达到68.49%和23.27%。

③ 制浆废水嗜热菌-混凝组合工艺对COD和色度的总去除率分别为84.98%和85.36%,嗜热菌生物膜单元和混凝单元对COD的去除分担率分别为68.58%和16.40%,对色度的去除分担率分别为23.36%和62.00%。三维荧光光谱分析表明,制浆废水中引起色度的类黑精和类木纤维素等物质主要通过混凝单元去除。

#### 参考文献:

- [1] KAMALI M, KHODAPARAST Z. Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 114: 326-342.
- [2] TOCZYLOWSKA-MAMINSKA R. Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment—a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78: 764-772.
- [3] BARWAL A, CHAUDHARY R. To study the performance of biocarriers in moving bed biofilm reactor

(MBBR) technology and kinetics of biofilm for retrofitting the existing aerobic treatment systems: a review [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2014, 13: 285-299.

- [4] QU X, GAO W J, HAN M N, *et al.* Integrated thermophilic submerged aerobic membrane bioreactor and electrochemical oxidation for pulp and paper effluent treatment—towards system closure [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 116: 1-8.
- [5] SIMSTICH B, BEIMFOHR C, HORN H. Lab scale experiments using a submerged MBR under thermophilic aerobic conditions for the treatment of paper mill deinking wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 122: 11-16.
- [6] HERMOSILLA D, MERAYO N, GASOCO A, *et al.* The application of advanced oxidation technologies to the treatment of effluents from the pulp and paper industry: a review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 168-191.
- [7] JIMENEZ J, GONIDEC E, RIVERO J A C, *et al.* Prediction of anaerobic biodegradability and bioaccessibility of municipal sludge by coupling sequential extractions with fluorescence spectroscopy: towards ADM1 variables characterization [J]. *Water Research*, 2014, 50: 359-372.

作者简介:舒彬(1995-),男,四川泸州人,硕士研究生,研究方向为水污染控制。

E-mail:shubin2019@163.com

收稿日期:2022-08-03

修回日期:2023-01-11

(编辑:刘贵春)